Metodología integral y dinámica aplicada a la programación y control de proyectos

Integral and dynamic methodology applied to scheduling and control project

Leonardo José Gonzalez, Dusko Kalenatic, Karol Vivivana Moreno*

Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos. Universidad de la Sabana. Campus Universitario del Puente del Común. Km 7 Autopista Norte de Bogotá, D.C. C.P. 250001 Chía, Colombia.

(Recibido el 28 de Marzo de 2011. Aceptado el 17 de febrero de 2012)

Resumen

Este trabajo presenta la aplicación de la metodología integral y dinámica en la programación y control dinámico de proyectos. Para esto, a partir de la metodología se desarrolla un modelo que combina redes de actividad AON (actividad en el nodo) bajo los supuestos CPM, ejecución multimodo y dinámica de sistemas. El modelo se operacionaliza por medio del desarrollo de una red de programación y una red de ejecución que interactúan a través de un bucle de control. La propuesta se valida utilizando las redes de 16 actividades de la librería MRCPSP de PSPLIB. El modelo derivado de la metodología presenta ventajas significativas en los indicadores característicos en gestión de proyectos. El trabajo concluye con la propuesta de nuevas combinaciones de herramientas, que unidas a la metodología permiten abordar problemas de programación y control de proyectos con mayor variabilidad y complejidad.

----- *Palabras clave:* CPM, Dinámica de sistemas, MPSP, Control de proyectos, Metodología Integral y dinámica

Abstract

This paper presents the implementation of the integral and dynamic methodology in the scheduling and dynamic control of projects. For this purpose and using the above-mentioned methodology, a model which combines activity networks AON (activity on node), CPM, multimode execution and system dynamics is developed. The model is operationalized by developing two separate networks, i.e., a scheduling network on the one hand and the execution network on the other hand, in order to interact through a control loop. The proposal is validated using activity networks with

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 1 + 861 55 55 ext. 2505, fax: + 57 + 1 + 861 55 55 ext. 2515, correo electrónico:leonardo.gonzalez1@unisabana.edu.co (L. Gonzalez)

16 activities selected from MRCPSP of PSPLIB library. The model derived from the methodology has significant advantages in characteristic indicators of the project management. The paper concludes with a proposal of new combinations of tools, which, together with the methodology, can address problems of scheduling and control of projects with greater variability and complexity.

----- *Keywords:* CPM, Systems Dynamic, MPSP, Project Control, integral and dynamic methodology

Introducción

El problema de programación o secuenciación de proyectos PSP (Project Scheduling Problem), busca determinar el tiempo de iniciación y finalización de cada actividad que pertenece al proyecto, con el fin de lograr el mejor desempeño posible en términos de una o varias funciones de evaluación, respetando los tiempos de ejecución de cada actividad, las precedencias lógicas y la disponibilidad de medios para su ejecución [1]. Por otra parte los desarrollos de la dinámica de sistemas iniciados y fundamentados en los escritos de Forrester [2, 3], basados en la aplicación de la teoría del control al análisis de sistemas sociales, son actualmente utilizados para modelar matemáticamente diferentes comportamientos estructurales de los sistemas, por medio de arquetipos [4] y han sido aplicados en diversos campos tales como el empresarial, ambiental, económico y comportamental, entre otros [5, 6]. Los fundamentos conceptuales de Forrester, unidos a los principios de PSP son acoplados en este artículo por medio de la utilización de la metodología integral y dinámica [7-9]. Como resultado se genera una metodología para desarrollar modelos de programación y control dinámico de proyectos. Estos modelos toman como base las de redes actividad con una representación AON (actividad en el nodo), en la que se articulan CPM, ejecución multimodo y dinámica de sistemas. Los modelos se operacionalizan por medio del desarrollo de una red de programación y una red de ejecución que se relacionan por medio de un bucle de control (bucle de retroalimentación negativa). Posteriormente se realiza un proceso de validación de la propuesta utilizando para este fin las redes de 16 actividades de la librería MRCPSP de PSPLIB, en el cual se pueden observar las ventajas de la propuesta en función de los indicadores típicos en gestión de proyectos. Finalmente se proponen posibles desarrollos futuros basados en la metodología que permiten combinar nuevas herramientas para abordar otros problemas de programación de proyectos.

Fundamentos conceptuales de la metodología

La propuesta presentada se soporta en la integración de tres elementos: Los fundamentos conceptuales de secuenciación y control de proyectos, la dinámica de sistemas y la metodología integral y dinámica. La ultima como estrategia de combinación de las primeras.

Secuenciación y control de proyectos

Los problemas de secuenciación de proyectos (PSP) se derivan del estudio de la interacción de actividades, relaciones de precedencia, recursos (disponibles y necesarios) y funciones de evaluación u objetivos administrativos del proyecto [10].

Las actividades según [11] son tareas o un conjunto de ellas, que son solicitadas por el proyecto y que requieren recursos y tiempo para completarse, [12] las define como la serie de problemas delimitados que componen un proyecto, y [13] precisa que una actividad es una labor que consume tiempo mientras las personas, equipos o ambos trabajan o esperan durante la ejecución del proyecto.

Las características más importantes de una actividad son: *La duración*, definida como el número unidades de tiempo requeridas para finalizar la actividad; *los requerimientos de recursos*, corresponden a la cantidad necesaria de cada recurso para ejecutar una actividad en un modo particular [14]; *el modo*, representa una combinación especifica de tiempo y recursos (tecnología) en la ejecución de la actividad, *fecha de disponibilidad*, señala el momento a partir del cual se puede iniciar la ejecución de la actividad; *fecha de entrega*, muestra el instante de tiempo en el que, a mas tardar, debe completarse una fracción de la actividad o la totalidad de la misma [1]*;* y *posibilidad de interrumpir*, indica si es viable técnicamente, segmentar la actividad o detener su ejecución con el fin de reasignar los recursos a la realización de otras actividades. Es una característica binaria.

Las relaciones de precedencia, representan la dependencia entre los momentos de inicio y finalización de una pareja de actividades. Según [15] existen cuatro tipos:

SS (Start-to-Start), inicio a inicio, cuando las actividades deben empezar al mismo tiempo, FF (Finish-to-Finish), fin a fin, si deben ser terminadas de forma simultánea, SF (Start-to-Finish), inicio a fin, cuando una actividad no puede ser concluida hasta tanto no se emprenda la otra y FS (Finish-to-Start), fin a inicio, indica que una actividad no puede principiar sin que haya finalizada la otra, siendo este tipo de relación la mas utilizada en los problemas de calendarización de proyectos.

Los recursos se definen como todo elemento necesario para realizar una tarea. Hacen parte de estos el personal, los recursos económicos, los materiales y los equipos entre otros [13].

Los recursos pueden ser clasificados de acuerdo a categorías, según su disponibilidad a lo largo del proyecto [16] como: Recursos *renovables,* cuando su disponibilidad es constante para cada unidad de tiempo, por lo que su utilización o no, no afecta la disponibilidad del recurso en unidades de tiempo posteriores; *no renovable* cuando la disponibilidad en el horizonte de planeación del proyecto es limitada, pero no esta restringida en cada periodo, por lo que la disponibilidad de recurso, depende de su utilización en unidades de tiempo anteriores; *los recursos doblemente restringidos*, están limitados tanto sobre el horizonte del proyecto como sobre cada periodo de tiempo; *los recursos parcialmente renovables,* definen la disponibilidad de un recurso para subconjuntos de periodos [1].

Las Funciones de evaluación u objetivos administrativos del proyecto más frecuentes en la literatura son: La minimización de la duración del proyecto (makespan) [17], la minimización del tiempo promedio de flujo o paso (ponderados), la minimización de los retrasos (ponderados) [18, 19], la maximización del valor presente neto (NPV) [16] y NPV con flujos de dinero positivos [20], la maximización de la calidad [21, 22], la minimización de los costos sobre recursos [23, 24] y la minimización de los costos sobre actividades, entre los que encontramos el problema time/cost trade–off [25].

En cuanto al control de proyectos se refiere, en la literatura [26, 27] se han encontrado los elementos típicos de un ciclo de control: planeación, medición, monitoreo y acciones correctivas, con sistemas de control que permiten monitorear la brecha entre lo planeado y lo ejecutado. Los sistemas de control de proyectos se pueden clasificar en unidimensionales y multidimensionales. Los unidimensionales, aunque pueden medir varios objetivos del proyecto en forma simultánea, solo utilizan uno de ellos en el ciclo de control, mientras que los multidimensionales utilizan simultáneamente varios objetivos en este ciclo. Otros autores [28] se han centrado en la determinación de puntos óptimos de control asociados al ciclo.

Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas surgió como un enfoque de modelado para analizar las interacciones de los diversos componentes de sistemas socioeconómicos complejos [2]. La aplicación de dinámica de sistemas en gestión de proyectos la

inicia [29], este enfoque de carácter estratégico, es complementado por diferentes autores durante las dos últimas décadas del siglo XX [30-33], basando su aplicación en una forma holística de ver el proceso de gestión, centrándose en los procesos de retroalimentación que tienen lugar en el sistema proyecto [34]. Dada la naturaleza dinámica de los proyectos este enfoque ha sido aplicado a la comprensión y mejoramiento del comportamiento de proyectos complejos [35].

Por otro lado [36] propone la combinación de las técnicas clásicas PERT-CPM con dinámica de sistemas para abordar el problema de gestión de proyectos, los cuales, al encontrar coincidencias entre los ciclos de control de proyectos y los bucles de realimentación negativa de dinámica de sistemas, [37, 38] han planteado propuestas en las que se combinan herramientas estáticas de planeación y la dinámica de sistemas para el control de proyectos.

Sin embargo en la literatura revisada no se propone una metodología para el modelado y representación de redes de actividad en el problema PSP multimodo, aplicando dinámica de sistemas, ni se integran estos conceptos en el contexto del control de proyectos.

La metodología integral y dinámica

La Metodología Integral Dinámica [7] parte de la hipótesis de la complementariedad entre las técnicas analíticas y numéricas, las primeras representadas por programación matemática, y en general por las técnicas de optimización, además de las heurísticas, y las segundas por la dinámica de sistemas (simulación continua) con todos sus elementos, estructuras y soporte matemático, así como por la simulación discreta, y las meta heurísticas.

La Metodología Integral y Dinámica comprende dos fases: la técnica y la organizacional:

La fase técnica tiene como finalidad definir claramente la relación entre el sistema objeto de estudio, los problemas asociados al mismo, así como las técnicas analíticas y numéricas utilizadas para su abordaje, y a partir de esto busca definir posibles combinaciones de técnicas que permitan enfrentar de la mejor forma los problemas identificados o si es posible un nuevo conjunto de problemas, comprende seis etapas básicas:

1. Definir el sistema: Consiste en determinar los elementos, interacciones, objetivos y límites del sistema. Esta etapa comprende la identificación de variables controlables y no controlables ligadas al sistema, sus interacciones y relación con la complejidad y variabilidad del sistema, así como el análisis de los paradigmas asociados al estudio del sistema, es decir la caracterización de los supuestos y simplificaciones utilizados.
2. Identificación de problemas ligados al sistema: Consiste en identificar los problemas que hasta ahora han sido asociados con el estudio del sistema, y como se relacionan los mismos con los diferentes supuestos, variables, interacciones y límites del sistema.
3. Identificación de técnicas clásicas: En esta etapa se determina el conjunto de técnicas analíticas y numéricas hasta ahora utilizadas para resolver los problemas ligados al sistema, así como sus contribuciones individuales y conjuntas a la resolución del mismo.
4. Análisis de complementariedad de técnicas analíticas y numéricas: En esta etapa se pretende aprovechar las ventajas de cada una de las técnicas al ser utilizadas de manera conjunta para el estudio y solución de un problema particular del sistema. En esencia esta etapa busca determinar que técnicas analíticas y numéricas son susceptibles de ser combinadas, en que forma, y que ventajas presenta su combinación con respecto a la aplicación clásica de las técnicas en diferentes términos, tales como: obtención de una visión más amplia o integral de la situación, posibilidad de abordar casos de mayor complejidad y variabilidad ligados al sistema, mayor representabilidad, etc.

5. Definición de problemas y prioridades: Esta etapa busca por una parte, identificar el conjunto de problemas que es posible abordar con las diferentes combinaciones de técnicas propuestas en la etapa anterior y cuáles de estos se pueden catalogar como nuevos o no clásicos, y por otra establecer prioridades para su solución, con respecto a las necesidades y objetivos sociales y organizacionales a corto, mediano o largo plazo.
6. Evaluación de combinaciones y elección de técnicas: Evaluar si en conjunto y de forma retroalimentada, las diferentes combinaciones de técnicas analíticas y numéricas permiten obtener mejores resultados que al ser utilizadas por separado para la resolución de problemas prioritarios, y elegir la mejor combinación.

La fase organizacional de la Metodología Integral y Dinámica busca la adecuada aplicación de la fase técnica, en un contexto organizacional. La importancia de esta fase radica en la asociación del problema particular con el nivel organizativo del sistema social en el cual se aplica la metodología y con la fase técnica de la misma. Consta de las siguientes etapas:

1. Determinar el problema concreto a resolver.
2. Determinar el nivel organizativo actual de la empresa.
3. Traducir el problema al lenguaje de los diferentes miembros del equipo implicado.
4. Determinar la información disponible como base para solución del problema.
5. Determinar alcances en relación a la solución del problema a corto, mediano y largo plazo, como consecuencia de la información disponible en relación al nivel organizativo.
6. Aplicación de la fase técnica de la metodología.
7. Implementación de las soluciones obtenidas.
8. Retroalimentación técnica y organizacional a partir de los resultados obtenidos.

En el presente artículo, por tratarse de un desarrollo netamente conceptual solo se aplicara la fase técnica de la metodología.

Modelado de proyectos utilizando dinámica de sistemas

La metodología integral y dinámica permite, combinar armónicamente las herramientas y conceptos clásicos de programación y control de proyectos con la dinámica de sistemas y se resume en los siguientes pasos:

1. Definir las características del proyecto:
    a. Definir el objetivo del proyecto
    b. Definir la tecnología del proyecto (Análisis de estructura), que consiste en determinar: la tecnología a utilizar en la ejecución del proyecto, el conjunto de actividades que lo componen, el orden lógico en términos de la precedencia y sucedencia de cada una de las actividades a partir de la tecnología seleccionada para la ejecución del mismo, las variables controlables y no controlables que afectan la duración de cada una de las actividades y su impacto en la ejecución de cada una de ellas y determinar si la duración de cada actividad es susceptible de ser representada como un parámetro o como función de variables internas y externas del proyecto.
    c. Definir la técnica o técnicas de representación del proyecto (grafica, matricial, etc.).
    d. Definir la técnica de análisis de tiempo a utilizar.
    e. Realizar análisis de recursos del proyecto, consistente en determinar las diferentes alternativas en la asignación de los recursos a cada una de las actividades del proyecto en función del objetivo y tecnología del proyecto.
2. Identificación de problemas asociados a la calendarización de proyectos.

3. Determinar el conjunto de técnicas analíticas y numéricas hasta ahora utilizadas para calendarizar y controlar el proyecto, los supuestos para su aplicación, así como sus contribuciones individuales y conjuntas a la resolución del mismo.

4. Determinar que técnicas son susceptibles de ser combinadas, en que forma y que ventajas generan en término de complejidad y variabilidad del conjunto de actividades analizadas.

5. Definir un nuevo conjunto de modelos y problemas ligados al sistema, que cumplen con el objetivo mejorar la representación de la realidad y establecer técnicas y prioridades para su solución, considerando las necesidades y objetivos de la organización en el tiempo.

6. Evaluar si en conjunto y de forma retroalimentada, la combinación de técnicas analíticas y numéricas permite obtener mejores resultados que al ser utilizadas por separado en la resolución de problemas prioritarios y elegir las técnicas para solucionar los mismos.

7. Realizar el modelo específico, la calendarización y/o el análisis recursos y/o costos del proyecto, de acuerdo a los objetivos trazados.

8. Retroalimentar el proceso, para generar posibles mejoras y ajustes en términos técnicos, organizacionales o económicos.

De la aplicación de estas ocho etapas surgió el símil dinámico de las redes de actividad AON, el cual se explica a continuación:

Inicialmente se combinan los conceptos de CPM y Dinámica de sistemas, con el fin de crear una red de programación, que indica los momentos de inicio y de finalización esperados para cada una de las actividades y del proyecto, trabajando en los modos base. Posteriormente para representar de la variabilidad asociada al desarrollo del proyecto, se crea una red de ejecución, que además, de los elementos anteriores incluye el efecto de variables exógenas como el clima, factores ambientales, sociales y económicos y de variables endógenas asociadas al rendimiento del personal, materiales y equipos asignados al desarrollo de las actividades.

Para responder a potenciales desviaciones respecto a lo programado, se adiciona el concepto de multimodo, inmerso en un bucle de control, que integra la estructura de un bucle de retroalimentación negativa y los elementos del PMBOK asociados a este campo, figura 1.

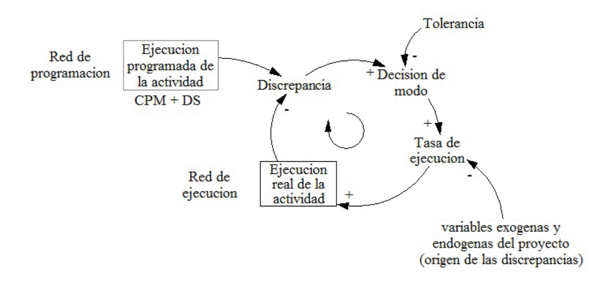


Figura 1 Ciclo de control

Así cuando el proyecto se aleja del nivel de ejecución programado en una proporción mayor a la tolerancia fijada (discrepancia), se genera un cambio de modo en la ejecución de las actividades que permite acelerar la ejecución de las mismas y cumplir así con expectativas de los gestores del proyecto.

Para operacionalizar la propuesta, se utiliza una representación del proyecto AON o PDM (Modelo de diagrama de precedencias) combinada con diagramas de Forrester, generando así la red de programación y la red de ejecución. Aquí las actividades se representan como niveles (nodos) con su respectivas tasas de ejecución y reproceso, las relaciones de precedencia se indican con flujos de información entre los niveles de las actividades precedentes y las tasas de ejecución de las actividades sucedientes (TEA), mediando entre ellas una variable auxiliar: la ejecución de la norma técnica de la actividad (ENT), figura 2.

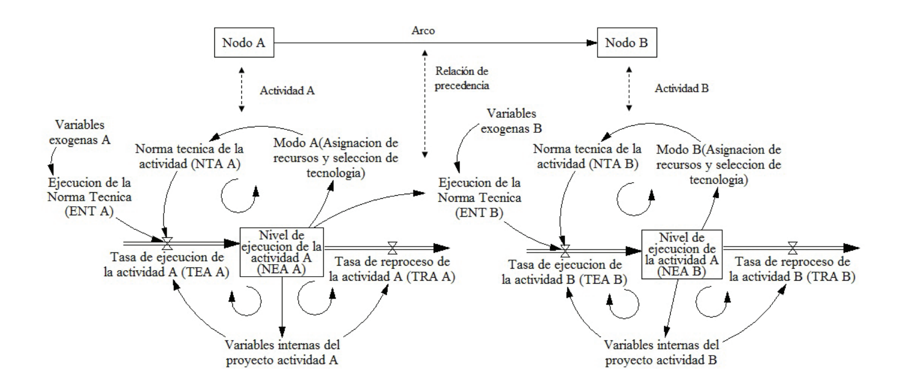


Figura 2 Representación de la red de actividades AON en un diagrama de Forrester

El nivel (NEA) se define en términos porcentuales (0-100%) y varía en el tiempo en función de TEA y de la tasa de reproceso TRA como se observa en (1):

$$NEA_K = NEA_J + (TEA_{JK} - TRA_{JK}) * DT \quad (1)$$

Donde TEA define el ritmo, en términos porcentuales, al que se ejecuta la actividad, en función de la norma técnica NTA (programada) y de ENT (ejecución bajo el efecto de la variabilidad). Aquí se toman las decisiones de iniciación de acuerdo a la estructura del proyecto, y las decisiones de cambio de modo de las actividades como respuesta a la desviación y tolerancias fijadas para el proyecto. Así solo si NEA_J es igual a 100% para toda actividad i precedente TEA_{JK} puede asumir valores mayores a cero.

En este contexto NTA es la duración estándar de la actividad para una tecnología particular y un nivel de asignación de recursos específico o modo.

Complementariamente ENT, trabaja como un multiplicador que permite enlazar variables exógenas, endógenas y modos con la velocidad de ejecución de la actividad. Así el multiplicador asume valores entre 0 y 1 dependiendo del modo que se esté utilizando (2).

$$\begin{aligned} &TEAJK = if\ (NEA \leq 100) \\ &\quad them \quad \{(100/NTA) * ENT\} \qquad (2) \\ &\quad Else \quad \{0\} \end{aligned}$$

Con el fin de generar indicadores de cumplimiento del proyecto y facilitar su control, el modelo se complementa con la agregación de las tasas de ejecución y las tasas de reproceso de cada una de las actividades en una variable, denominada tasa de ejecución del proyecto TEP, la que se asocia al nivel de ejecución del proyecto NEP, ver figura 3.

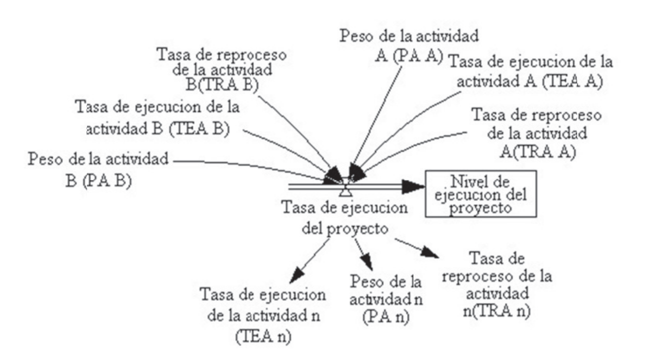


Figura 3 Generación del indicador del nivel de ejecución del proyecto

Para este cometido la agregación se puede realizar de forma simple o ponderada. La forma simple que presupone un igual peso de cada actividad en la ejecución total del proyecto (3)

$$TEP = \frac{\sum_{i=1}^{n} TEA_i - TRA_i}{n} \quad (3)$$

A su vez la forma ponderada de agregar las tasas supone un aporte no equitativo de cada actividad a la ejecución del proyecto P_i (4):

$$TEP = \sum_{i=1}^{n} P_i * (TEA_i - TRA_i) \text{ Donde } \sum_{i=1}^{n} P_i = 1 \qquad (4)$$

Al unir la totalidad de estos elementos se obtiene un modelo dinámico que combina CPM, dinámica de sistemas, decisiones de modo, redes de actividad y un sistema de control como se puede observar en la figura 4.

Validación

Para la validación de la metodología propuesta se utilizaron 15 redes de 16 actividades con 3 modos de ejecución de la librería MRCPSP de PSPLIB (Project Scheduling Problem Library), la experimentación fue realizada en el software Vemsim PLE 5.10®.

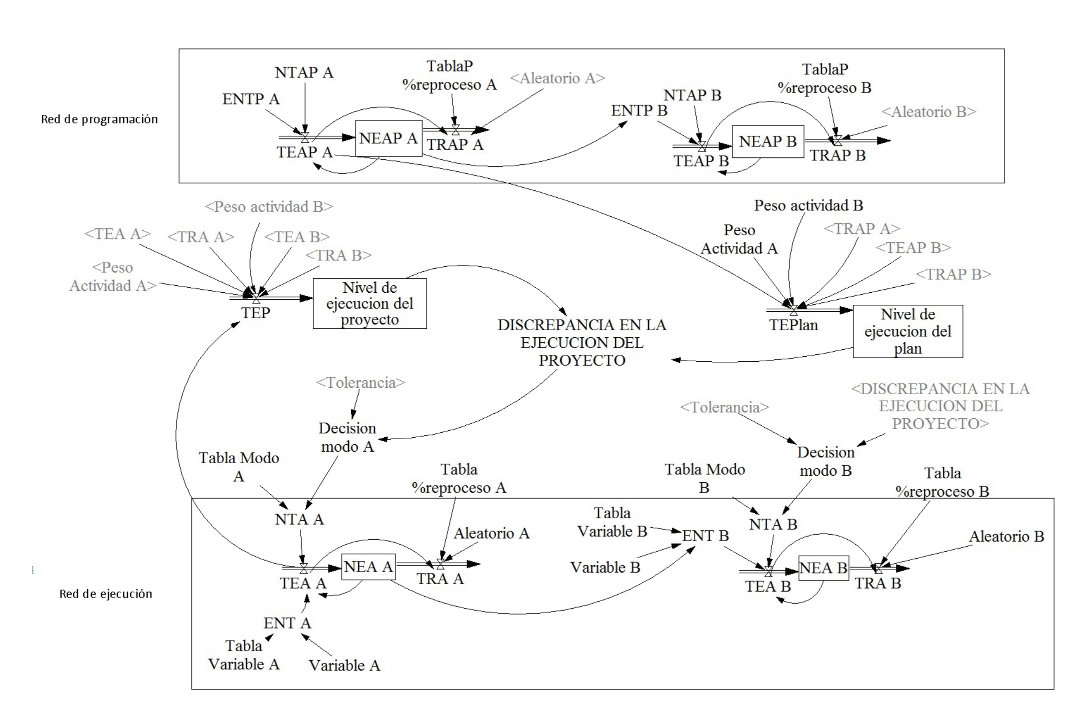


Figura 4 Modelo dinámico de programación y control de proyectos con multimodo

La figura 5 resume la totalidad de la metodología propuesta.

El efecto de las variables exógenas en la ejecución del proyecto, se simulo dando un valor de 0,8 a la ENT de las actividades, lo que hace que cada actividad del proyecto se ejecute a un 80% de la programación inicial. Como límite a las desviaciones generadas en este experimento, se eligieron dos tolerancias cada una asociada a uno de los modos ejecución.

Las tolerancias utilizadas fueron de 2% y 5% de discrepancia con respecto a la ejecución programada del proyecto. La tolerancia del 5% se asocio a los modos que generaban una mayor aceleración en la ejecución de la actividad. Los reprocesos se simularon como una variable aleatoria con probabilidad de ocurrencia de 0,1.

Las tolerancias utilizadas fueron de 2% y 5% de discrepancia con respecto a la ejecución programada del proyecto. La tolerancia del 5% se asocio a los modos que generaban una mayor aceleración en la ejecución de la actividad. Los reprocesos se simularon como una variable aleatoria con probabilidad de ocurrencia de 0,1.

En la figura 6 se puede apreciar un comparativo entre el comportamiento de diferentes variables del proyecto, con la estrategia de cambio de modo en función de las tolerancias versus el comportamiento de estas sin ninguna estrategia de control de una de las redes. Con el objetivo

de evaluar el impacto económico de acelerar el proyecto mediante la asignación de más recursos a cada actividad, representados en la duración de cada modo de ejecución, a cada modo se le asigno un costo acorde a la variación de la intensidad del uso de los recursos. La experimentación realizada arroja los resultados mostrados en la tabla 1.

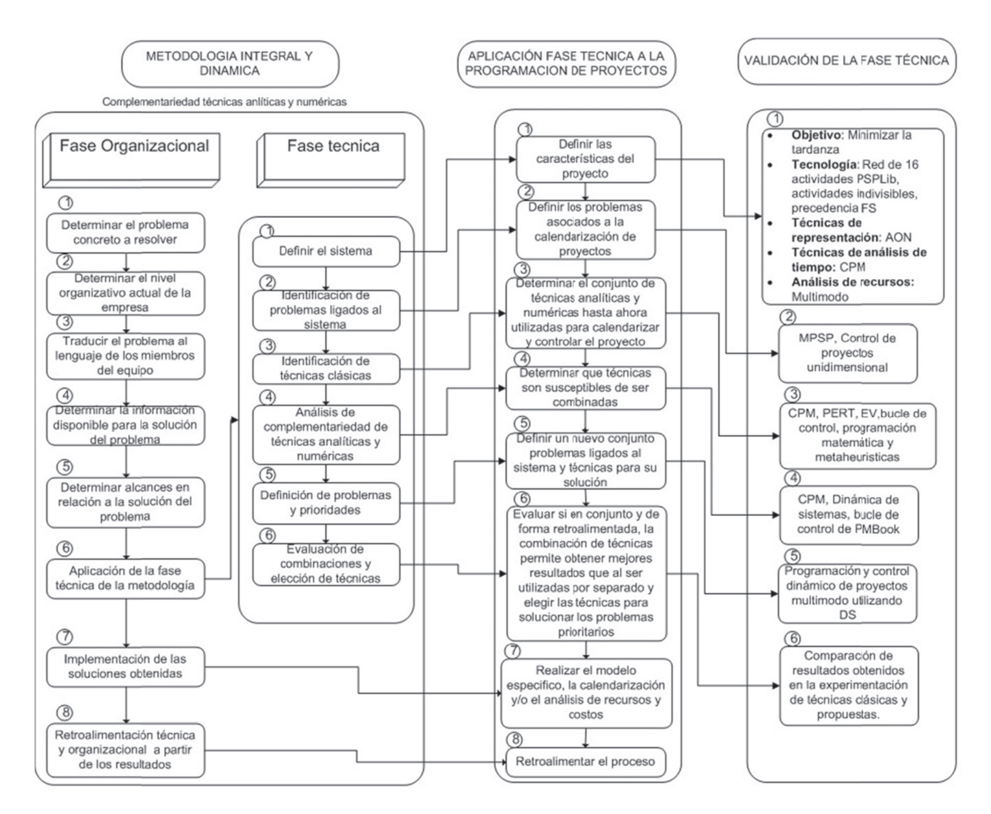


Figura 5 Aplicación y validación de la metodología integral y dinámica en la programación de proyectos

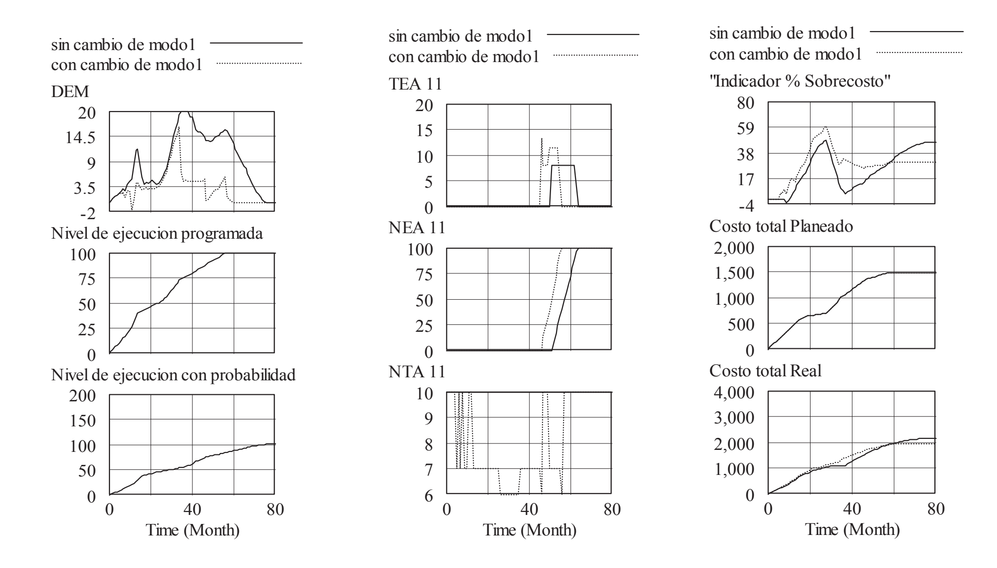


Figura 6 Comportamiento de algunas variables del proyecto, con y sin estrategia de control

Como se observa en los diferentes resultados asociados a ejecución, costo, tiempo y discrepancia, el uso combinado de las herramientas propuestas genera ventajas significativas en relación con la utilización parcial de las mismas. Tal es así que a pesar de utilizar modos de ejecución más costosos, el costo total promedio del proyecto de las redes con las que se experimento es menor que al usar únicamente los modos base (estrategia sin control dinámico).

Tabla 1 Duración y costo total de la programación y ejecución del proyecto con y sin estrategia de control

	Duración del proyecto			***Costo Total del Proyecto***		
RED	***Programado***	***Ejecución sin estrategia***	***Ejecución con estrategia***	***Programado***	***Ejecución sin estrategia***	***Ejecución con estrategia***
1	46	65	48	1464	1913	1670
2	48	60	51	2301	2899	2625
3	54	73	58	2412	3109	2780
4	56	68	60	877	1123	1117
5	54	67	55	1202	1548	1553
6	67	87	62	1232	1513	1590
7	53	72	62	1101	1410	1439
8	47	61	53	2593	3454	2862
9	63	86	67	2413	3137	2802
10	52	62	57	2774	3501	2841
11	62	78	65	2683	3397	3257
12	47	66	49	1595	2165	1883
13	45	56	46	1092	1389	1327
14	47	64	51	1169	1506	1510
15	44	62	47	954	1234	1212
Promedio	**52,3**	**68,5**	**55**	**1724**	**2220**	**2031**
Sobre-costo promedio					**28,8%**	**17,8%**

Por otro lado la duración del proyecto también disminuye con la estrategia con control dinámico al compararlo con el resultado promedio de la estrategia sin control.

Conclusiones

A pesar de la alta concentración de estudios alrededor de la planeación y programación de proyectos [39], estudios como el de [40] identifican que las técnicas tradicionales de planeación y programación presentan dificultades para detectar desviaciones, demoras y retrasos, así como para identificar sus causas, a su vez [41] observó que en una muestra de 130 proyectos, el 81,5% de estos terminaron fuera de los tiempos estimados originales. Estos estudios demuestran la necesidad de técnicas y metodologías que

de control que permitan detectar y medir las desviaciones o discrepancias con respecto a la planeación original, así como las acciones necesarias para minimizarlas y cumplir con los objetivos del proyecto.

La representación dinámica de redes de actividad además de estar acorde a las técnicas clásicas de programación de proyectos y de ser compatible con las mismas, facilita los procesos programación y control de proyectos, con alta variabilidad, originada en la influencia de elementos no controlables, y permite generar resultados con ventajas técnico-económicas significativas. Esto se evidencia en la validación realizada, observando que el promedio de la duración del proyecto, en las redes simuladas utilizando la estrategia de control solo presento una desviación del 3,9% en relación a la duración planeada, frente a un 30,9%, observado al simular sin estrategia, igual comportamiento se evidencio en los costos.

Con la metodología propuesta es posible abordar futuros trabajos de simulación de proyectos complejos que incluyan el efecto de variables aleatorias internas y externas, tales como, rendimiento de los equipos, efectos del comportamiento del personal, calidad del material y demoras en los abastecimientos de recursos, entre otros.

Adicionalmente se propone utilizar la metodología en futuras investigaciones para representar proyectos que integran recursos renovables y no renovables ligados a los modos de ejecución, priorizando las actividades y la asignación de recursos con el fin de impactar en mayor medida en los indicadores de tiempo, costo y ejecución del proyecto.

Referencias

1. F. Ballestin. *Nuevos métodos de resolución del problema de secuenciación de proyectos con recursos limitados*. 1ª ed. Ed. Universitat de Valencia-Servei de publicacions. Valencia (España). 2002. pp. 5-9.
2. J. Forrester. *Industrial Dynamics*. Ed. Pegasus communications, M.I.T. Press. Cambridge. 1961. pp. 9-101.
3. J. Forrester. *Principles of systems*. Ed. Wright-Allen Press. Cambridge. 1968. pp.1-79.
4. P. Senge. *The fifth discipline*. Ed. Doubleday. New York (U.S.A). 1994. pp.378-390.
5. J. Sterman. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Ed. McGraw-Hill/ Irwin. (U.S.A). 2000. pp. 41-290.
6. D. Drew. *Dinámica de sistemas Aplicada*. Isdefe. Madrid (España). 1995. pp. 67-163.
7. D. Kalenatic, L. González, C. López, L. Arias. “El sistema de gestión tecnológica como parte del sistema logístico en la era del conocimiento”. *Cuadernos de Administración*. Vol. 22. 2009. pp. 257-286.
8. D. Kalenatic, L. Mancera, K. Moreno, L. González. “Metodología de planeación logística basada en gestión de proyectos y dinámica de sistemas en empresas prestadoras de servicios”. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía*. Nº. 58. 2011. pp. 208-218.
9. D. Kalenatic, C. Lopez, L. González, F. Rueda. *Modelos Matemáticos aplicados a la logística Focalizada*, Ed. Kalenatic. Bogotá. 2010. pp 8-25.
10. R. Slowinski, B. Soniewicki, J. Weglarz. “DSS for multiobjective project scheduling”. *European Journal of Operational Research*. Vol. 79. 1994. pp. 220-229.
11. J. R. Meredith, S. J. Mantel. *Project Management: a Managerial Approach*. Ed. John Wiley & Sons. New York (USA). 2003. pp. 20 - 30.
12. D. Kalenatic. *Técnicas de planeación de redes*. 1 ed. Ed. Universidad Disrital Francisco José de Caldas. Biblioteca catedráticos. Bogota (Colombia). 1987. pp.1-3.
13. C. Gray, E. Larson. *Project Management: The Managerial Process*. Ed. McGraw-Hill. Singapore. 2006. pp. 5-20.
14. J. Aristizábal, H. Zárate. *Diseño e Implementación de un Algoritmo Genético para la Calendarización de Actividades de un Proyecto Variando la Disponibilidad de los Recursos*. Ed. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogota (Colombia). 2006. pp. 48-49.
15. S. Elmaghraby, J. Kamburowski. “The analysis of activity networks under generalized precedence relations (GPRs)”. *Management science*. Vol.38. 1992. pp. 1245-1263.
16. R. Bey, R. Doersch, J. Patterson. “The Net Present Value Criterion: Its Impact on Project Schedulin.” *Project Management Quaterly*. Vol. 12. 1981. pp. 35-45.

17. R. Kolisch, R. Padman. "An Integrated survey of deterministic project scheduling". *Omega*. Vol. 29. 2000. pp. 249-272.

18. R. Slowinski. "Multiobjective project scheduling under multiple-category resource constraints". R. Slowinski, J. Weglarz (editors). *Advances in project scheduling,* Ed. Elsevier. Amsterdam. 1989. pp. 151-167.

19. A. Sprecher, A. Drexl. "Multi-mode resource-constrained project scheduling by a simple, general and powerful sequencing algorithm". *European Journal of Operational Research*. Vol. 107. 1998. pp. 431-50.

20. E. Herroelen, B. Demeulemeester, A. De Reyck. "Classification Scheme for Project Scheduling". J. Weglarz, *Project Scheduling – Recent Models, Algorithms and Applications*. Ed. Kluwer Academic Publishers. Boston (USA). 1999. pp. 1-26.

21. O. Icmeli, W. Rom. "Ensuring quality in Resourse Constrained project Scheduling". *European Journal of Operational Research*. Vol. 103. 1997. pp. 483-496.

22. O. Icmeli, W. Rom. "Analysis of the Characteristics of projects in Diverse Industries". *Journal of Operational Research Management.* Vol. 16. 1998. pp. 43-61.

23. M. Bandelloni, M. Tucci, R. Rinaldi. "Optimal resource leveling using non-serial dynamic programming". *European Journal of Operational Research.* Vol. 78. 1994. pp. 162-77.

24. K. Brinkmann, K. Neumann. "Heuristic procedures for resource-constrained project scheduling with minimal and maximal time lags the resource leveling and the minimum project-duration problem". *Journal of Decision Systems*. Vol. 5. 1996. pp. 129-55.

25. E. Demeulemeester, W. Herroelen, S. Elmaghraby. "Optimal Procedures for the Discrete Time/cost Trade-Off Problem in project Networks". *European Journal of Operational Research*. Vol. 88. 1996. pp. 50-68.

26. S. Rozenes, G. Vitner, S. Spraggett. "Multidimensional Project Control System". *Project Management Journal*. Vol. 22. 2004. pp. 109-118.

27. S. Rozenes, G. Vitner, S. Praggett. "Project Control: Literature Review". *Project Management Journal.* Vol. 37. 2006. pp. 5-14.

28. T. Raz, E. Erdal. "Optimal timing of project control points". *European Journal of Operational Research*. Vol. 127. 2000. pp. 252-261.

29. K. Cooper. "Naval Ship Production: A Claim Settled and A Framework Built". *Interfaces.* Vol. 10. 1980. pp. 20-36.

30. D. Kalenatic, C. López, L. González, F. Rueda. *Logística Focalizada: Aspectos conceptuales y modelos aplicados*. Ed. Universidad Católica de Colombia. Bogotá (Colombia). 2010. pp. 35-51.

31. E. Wolstenholme. *System Enquiry - A System Dynamics Approach*. Ed. John Wiley & Sons. Chicbester (Inglaterra). 1990. pp. 100-185.

32. T. Abdel-Hamid, S. Madnick, *Software Project Dynamics: An Integrated Approach*. Ed. Prentice-Hall. New Jersey (USA). 1991. pp. 63-135.

33. T. Williams. "The Effects of Design Changes and Delays on Project Costs". *Journal of the Operational Research Society*. Vol. 46. 1995. pp. 809-818.

34. A. Rodrigues, J. Bowers. "System Dynamics in Project Management: A Comparative Analysis With Traditional Methods". *System Dynamics Review*. Vol. 12. 1996. pp. 121-139.

35. J. Lyneis, K. Cooper, S. Els. "Strategic Management of Complex Projects: A Case Study Using System Dynamics". *System Dynamics Review*. Vol. 17. 2001. pp. 237-260.

36. A. Rodrigues. *SYDPIM integration of SD and PERT/CPM tools: Assessing Fagan Analysis in a large-scale software project*. Memorias 17 International conference of de system dynamics society. Wellington. New Zealand. N.º 123. 1999. pp. 1-13.

37. K. Choi, D. Bae. "Dynamic project performance estimation by combining static estimation models with system dynamics". *Information and software technology*. Vol. 51. 2009. pp. 162-172.

38. S. Lee, F. Peña-Mora, M. Park. "Dynamic planning and control methodology for strategic and operational construction project management". *Automation in construction*. Vol. 15. 2006. pp. 84-97.

39. E. Demeulemeester, W. Herroelen. *Project Scheduling, A research Handbook.* Ed. Kluwer Academic Publishers. USA. 2002. pp. 160-500.

40. T. Williams. "Assessing Extension of Time delays on major projects". *International Journal of Project Management.* Vol. 21. 2003. pp. 19-26.

41. A. Al-Momani, "Construction delay: a quantitative analysis". *International Journal of Project Management.* Vol. 18. 2000. pp. 51-59.